

Title	モスアイ型反射防止構造を用いたシンチレーション・カウンター性能の劇的改善
Author(s)	福留, 美樹
Citation	平成30年度学部学生による自主研究奨励事業研究成果報告書
Issue Date	2019-04
oaire:version	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/71936
rights	
Note	

Osaka University Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

Osaka University

平成 3 0 年度学部学生による自主研究奨励事業研究成果報告書

ふりがな 氏 名	ふくとめ みき 福留 美樹	学部 学科	理学部物理学科	学年	3 年
ふりがな 共 同 研究者氏名		学部 学科		学年	年
					年
					年
アドバイザー教員 氏名	福田 光順	所属	理学研究科物理学専攻		
研究課題名	モスアイ型反射防止構造を用いたシンチレーション・カウンター性能の劇 的改善				
研究成果の概要	研究目的、研究計画、研究方法、研究経過、研究成果等について記述すること。必要に応じて用紙 を追加してもよい。(先行する研究を引用する場合は、「阪大生のためのアカデミックライティング 入門」に従い、盗作剽窃にならないように引用部分を明示し文末に参考文献リストをつけること。)				

研究の動機・目的

光を利用した放射線検出器であるシンチレーションカウンターのエネルギー及び時間の分解能は、シンチレータである無機結晶が放射線と相互作用してできる光子の数に依存している。検出器の性能を上げるために、発生する光子の数を増やす方法を検討していた折、一般的なシンチレータとして用いられる無機結晶の屈折率は非常に大きいことに注目した。(水や大気など私たちの身の回りにある物質の屈折率は 1.0-1.5 であるのに対し、シンチレータで用いられる無機結晶の屈折率は 1.8-2.2 もある。)それによって境界面で反射(シンチレータの屈折率 2.15 の場合は反射率 75%)が起こり、光センサーへの集光効率を下げる一大要因となっていると考えられる。

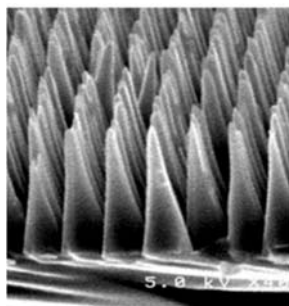


図 1 モスアイ型反射防止構造

そこで図 1 に示すような、表面に光の波長より短い周期(<250nm)の繰り返し構造を持つモスアイ型反射防止構造を利用することを考えた。これにより、面の面から奥に行くに従って物質密度が上がり屈折率が連続的に変化することで、屈折率が不連続になる境界面がなく、反射は無くなる。よって反射による光子数の減少を防止できる可能性がある。本研究の目的は、モスアイ型反射防止構造を利用することでシンチレーションカウンターの性能を飛躍的に向上させることである。

研究の方法と過程

基材にモスアイ構造を形成する技術を持った企業はいくらかある。今回は三菱ケミカル株式会社が開発したモスアイ型高機能フィルム・モスマイトを用いた。このモスマイトの屈折率は 1.56~1.60 であるので、その上にそれより高い屈折率の流動性物質を塗った。これを挟んでシンチレータと光センサー(光電子増倍管)を接合した(図 2)。高屈折率の流動性物質には SIMADZU が開発した屈折率 1.78 の接触液、高屈折率の無機結晶シンチレータには GSO($\text{Gd}_2\text{SiO}_5:\text{Ce}$)と CsI(Tl)を用いた。

モスマイト、光電面

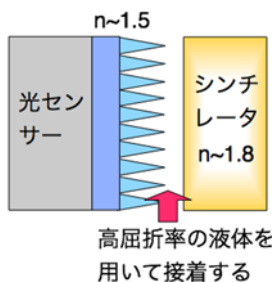


図 2 シンチレータと光センサーをモスマイトと高屈折率の流動性物質で接合する様子

そして、光センサーに高電圧(1.6-1.8kV)をかけ、標準線源(^{137}Cs , ^{22}Na)を用いてエネルギースペクトルを測定した。

一般的にシンチレータと光センサーはグリース(屈折率~1.5)という液状の潤滑油を用いて接合する。以上で説明したように接合面にモスアイ型フィルムを用いると無機結晶が放射線と相互作用してできる光の反射率が軽減し、光センサーに入射する光子数が増大する。したがってエネルギースペクトルにおけるピークチャンネルが大きくなると考えられる(図 3)。

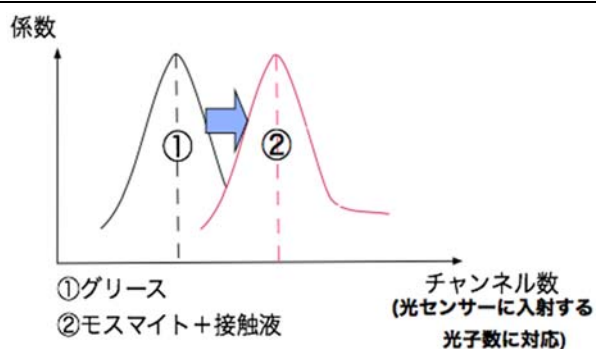


図 3 接合状態の違いによるピークチャンネルの差

そこで、シンチレータと光センサーを(1)何も挟まない、(2)グリースのみ、(3)モスマイトのみ、(4)モスマイトとグリース、(5)モスマイトと接触液という 5 種類の接合方法でくっつけて、エネルギースペクトルを測定し、そのピークチャンネルを比較した。

研究の結果、考察

(i)GSO を用いた場合

接合部に何も挟まず、 ^{137}Cs のエネルギースペクトルを測定すると以下のような図が得られる。

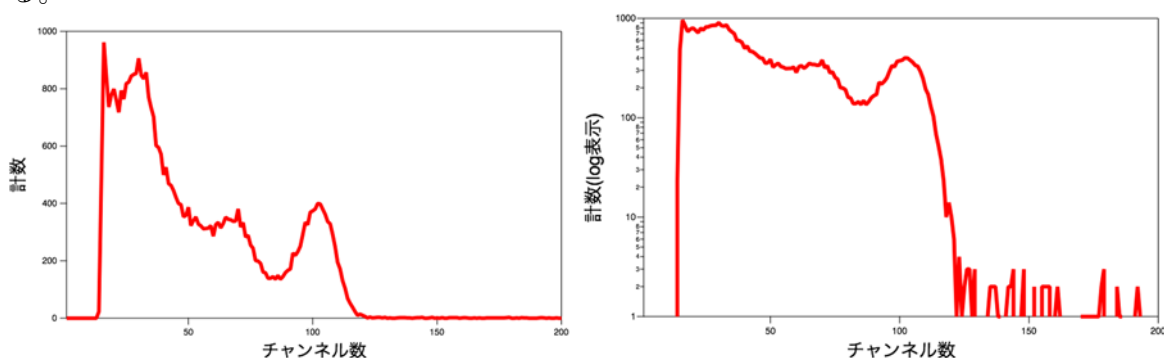


図 4 ^{137}Cs のエネルギースペクトル(接合部に何も挟まない場合)(右図は左図の縦軸を log 表示)
横軸はチャンネル数で、 ^{137}Cs から放出される γ 線のエネルギーに対応し、縦軸は計数(カウント数)を示す。 ^{137}Cs は β 崩壊により電子を放出して ^{137}Ba の励起状態に崩壊し、その後直ちに γ 線を放出して基底状態に遷移する。図 4 において黒線で囲われているところは 661.7keV のピークである。この部分をガウス関数でフィッティングして中心値を求める。
光センサーに入射する光子が多い(すなわち接合部での反射率が低い)ほどピークの中心値は大きくなる。したがってピークの中心値は光センサーに入射した光子数に対応する。
シンチレータと光センサーを(1)何も挟まない、(2)グリースのみ、(3)モスマイトのみ、(4)モスマイトとグリース、(5)モスマイトと接触液という 5 種類の接合方法でくっつけたときの、それぞれのピークの中心値を以下に示す。誤差は点の中に埋もれてしまうほど小さくなった。

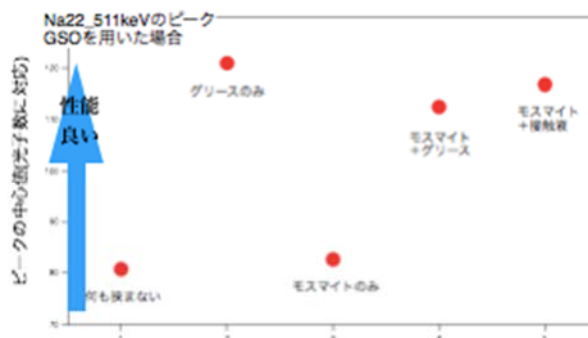
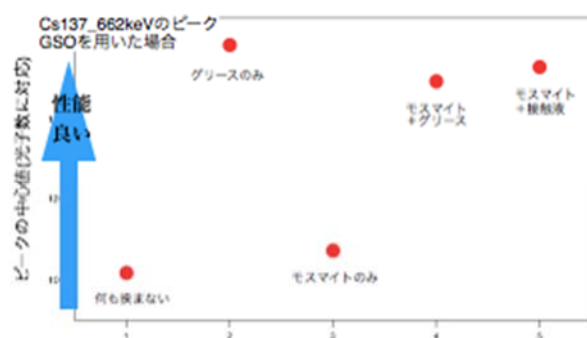


図 5(左) 図 6(右) 各接合状態での ^{137}Cs の 662keV、 ^{22}Na の 511keV(※1)のピークの中心値
 ※1 ^{22}Na は β 崩壊により陽電子を放出するが、陽電子が運動エネルギーを失った後に物質中の電子と対消滅し、電子の静止質量(511keV)に等しい 2 個の γ 線を反対方向に放出する。そのうちの 하나가検出器に入射し、エネルギースペクトルにピークとして表れる。
 接合部にグリースのみを用いた場合と、モスマイトとグリースまたは接触液を用いた場合では、ピークの中心値にあまり違いは見られなかった。

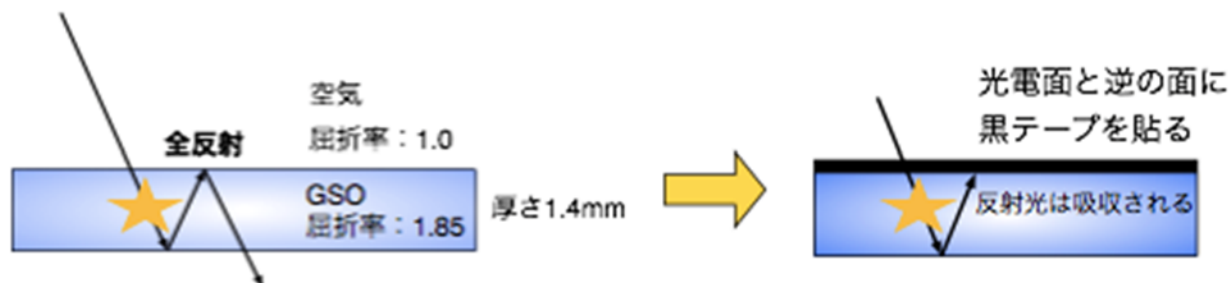


図 7 シンチレータ内で起きる全反射を黒テープにより防止

その理由として、図 4.5 に示すように光電面で反射されてもシンチレータの表面で全反射されて再度光電面に入射する場合が考えられる。シンチレータはアルミホイルで覆われているが、間に空気の層があり、空気とシンチレータの屈折率の差の大きさからほぼ必ず全反射を起こすと考えられる。1 度目の入射における透過率が知りたいので、シンチレータの表面に黒テープを貼り、反射された光はシンチレータ表面で吸収されるようにした。
 それからもう一度測定を行なった結果を以下に示す。

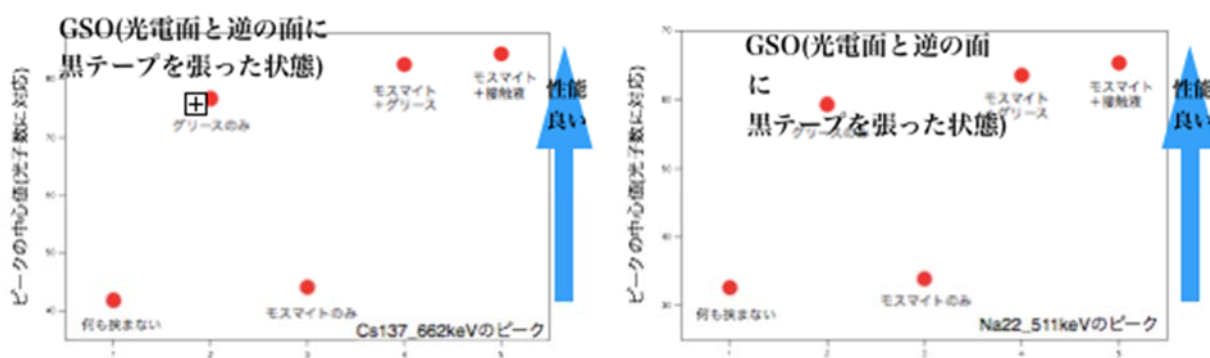


図 8(左)、9(右) 各接合状態での ^{137}Cs の 662keV、 ^{22}Na の 511keV のピークの中心値(シンチレータに黒テープ付き)

表 1 に接合部がグリースのみ、モスマイトとグリース、あるいは接触液の状態におけるピークの中心値を示す。

	グリースのみ	モスマイト+グリース	モスマイト+接触液
Cs137_622keV	76.71(6)	82.54(5)	84.39(8)
Na22_511keV	59.3(1)	63.5(1)	65.3(1)

表 1 各接合状態でのピークの中心値

接合部がグリースのみの状態に対して、モスマイトとグリースの状態のピークの中心値は約 7%、モスマイトと接触材の状態の場合は約 10%大きくなることわかる。

(ii)CsI(Tl)を用いた場合

(i)と同様に、シンチレータと光センサーを(1)何も挟まない、(2)グリースのみ、(3)モスマイトのみ、(4)モスマイトとグリース、(5)モスマイトと接触液という 5 種類の接合方法でくっつけたときの、それぞれのピークの中心値を以下に示す。

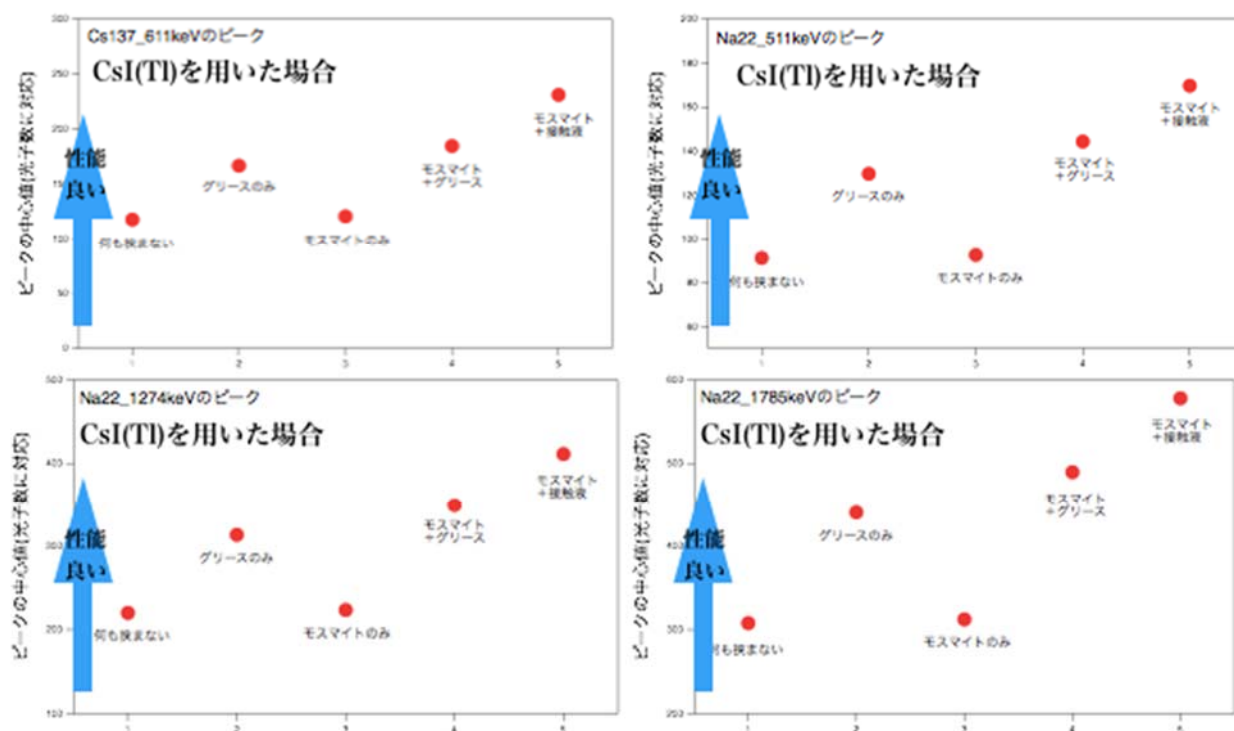


図 10(左上),11(右上),12(左下),13(右下) 各接合状態での ^{137}Cs の 662keV、 ^{22}Na の 511keV、1274keV、1785keV のピークの中心値

表 2 に接合部がグリースのみ、モスマイトとグリース、あるいは接触液の状態におけるピークの中心値を示す。

	グリースのみ	モスマイト+グリース	モスマイト+接触液
Cs137_622keV	166.9(6)	184.84(6)	231.18(9)
Na22_511keV	129.81(2)	144.43(4)	169.75(6)
Na22_1274keV	313.4(1)	349.1(1)	411.2(1)
Na22_12785keV	440.3(2)	489.5(2)	578.2(2)

表 2 各接合状態でのピークの中心値

接合部がグリースのみの状態に対して、モスマイトとグリースの状態のピークの中心値は 10-13%、モスマイトと接触液の状態の場合は 30-40%大きくなることがわかる。

GSO のときと比べて光子数の増大率が大きくなっているが、この理由の一つはシンチレータの大きさと考えられる。今回の実験で用いた GSO の厚さが 1.4 mm であるのに対し、CsI(Tl)の厚さは 30 cm である。したがって光電面で反射された光子はシンチレータ内で吸収される確率が高くなる。

また、各ピークのエネルギー分解能を求めたところ驚くべき結果が得られた。まずエネルギー分解能の求め方について説明する。

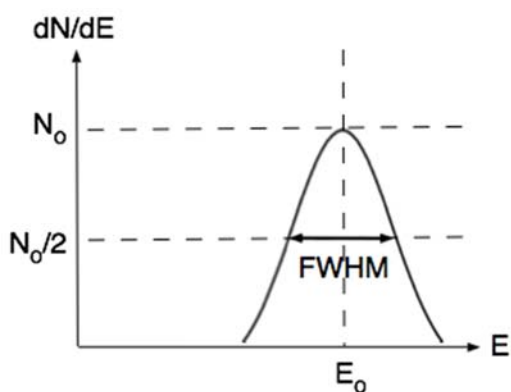
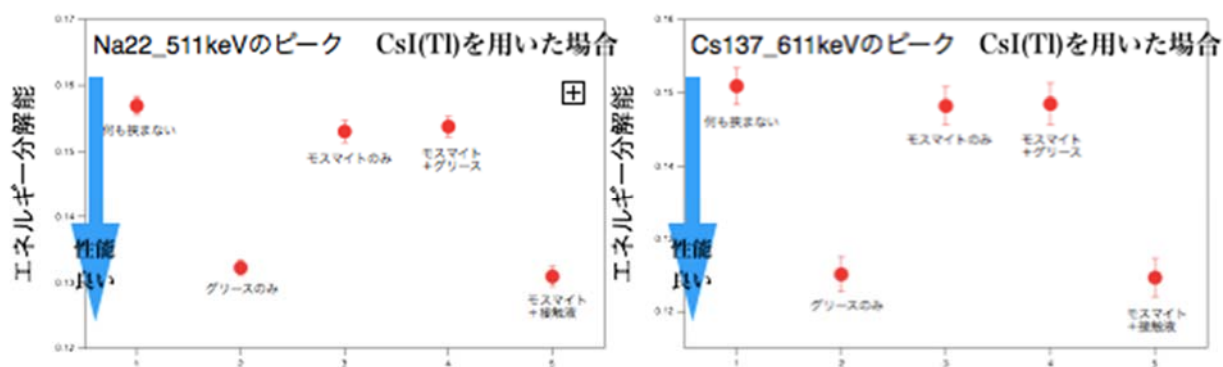
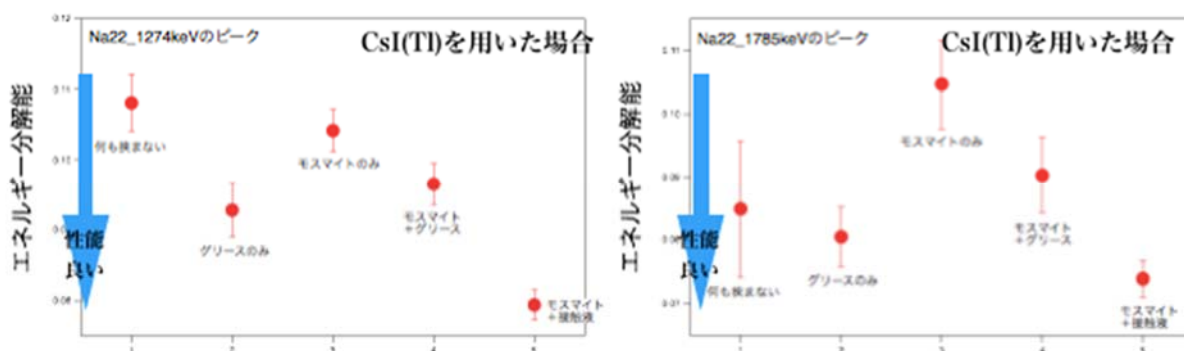


図 14 模式的なエネルギースペクトル

検出器を用いて放射線の円ルギーを測定する場合、単一エネルギーの放射線がそのエネルギーを検出器中で全て失ったとしても、出力波形分布はデルタ関数にはならず図 14 に示すようにある広がりを持つ。その第一の原因としては、光電子数のゆらぎなど検出器の固有の統計的変動が挙げられる。その他の原因として、回路のノイズなどがある。ピーク最高値の半分の高さにおける分布の幅を半値幅(full width at half maximum;FWHM)とよぶ。エネルギー分解能 R は、FWHM をピークの中央の値 E_0 で割った値、 $R = \frac{FWHM}{E_0}$ で定義される。

シンチレータと光センサーを(1)何も挟まない、(2)グリースのみ、(3)モスマイトのみ、(4)モスマイトとグリース、(5)モスマイトと接触液という 5 種類の接合方法でくっつけたときの、それぞれのピークのエネルギー分解能を以下に示す。

図 15(左),16(右) 各接合状態での ^{137}Cs の 662keV, ^{22}Na の 511keV のピークのエネルギー分解能図 17(左),18(右) 各接合状態での ^{22}Na の 1274keV,1785keV のピークのエネルギー分解能

接合部がグリースのみの状態とモスマイトと接触液を用いた状態でのそれぞれのエネルギー分解能を比較して、エネルギーが 500-600keV の領域ではあまり差はないが、1MeV 以上になるとモスマイトと接触液を用いて測定したときの方がエネルギー分解能が良くなっていることがわか

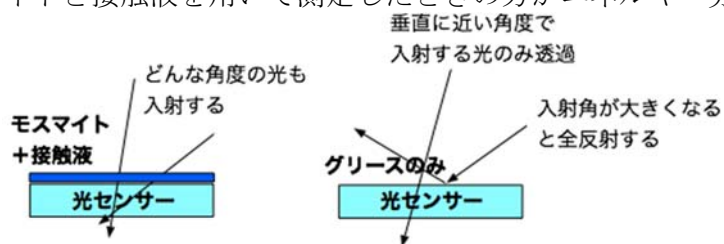


図 19 各接合状態での透過する光の

入射角度の範囲

エネルギー分解能が小さくなった理由として、光センサーに入射する光子数が増えたことの他に以下のようなことが挙げられる。モスマイトと高屈折率の接触液を用いた場合は、シンチレータと光センサーの屈折率が連続的に変化するため、どのような角度から光も透過する。一方、グリースで接合した場合は、入射角が大きくなると全反射するため、垂直に近い角度で入射した光のみ透過する。すなわちシンチレータのどの場所で発光したかによって反射率が異なるため、位置依存性が生じ、エネルギー分解能が悪くなると考えられる。

本研究で得られた成果

モスマイト型反射防止フィルム(モスマイト)と高屈折の接触液を用いて、光センサーとシンチレータの境界面で屈折率を連続的に変化させることにより、従来の方法(グリースを用いる)で接合するよりも、GSO(厚さ 1.4 mm、接合面と逆の面に黒テープを貼り、シンチレータ内での全反射を阻止)では約 10%、CsI(Tl)では約 30%も光センサーに入射する光子数を増大することができた。また、CsI(Tl)を用いた測定では、1 MeV 以上の領域においてエネルギー分解能が 10-20%よくなることがわかった。本研究の結果は、ごく簡単なハードウェアの処理でシンチレーション検出器全般の性能を大きく改善できる可能性を示している。

シンチレーションカウンターは、素粒子・原子核・宇宙線物理学の研究のみならず、X線撮影装置や医療用 PET などの放射線医学、食品・荷物・車体の検査装置、環境モニタリングなど幅広く社会において活用されている。本研究による性能向上により、これらの分野に大きな技術改革をもたらすことができる。また、光を利用する放射線検出器は集光の効率が要点となっている場合が多く、本研究の結果は一般的な光放射線検出器全般に渡って大きく貢献できることにつながり、大きな意義があると言える。

参考文献

杉山清寛、福田光順、山中千博、下田正 編 第 4 版 物理学実験 一大阪大学理学部物理学科・物理学実験テキスト 2016 年出版